

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. High Volume Fly Ash Concrete (HVFAC)

High Volume Fly Ash Concrete (HVFAC) adalah campuran beton yang menggunakan *fly ash* lebih 50% dari berat binder yang digunakan. Teknologi tersebut memiliki tujuan untuk menanggulangi dampak penggunaan semen yang berlebihan, oleh karena pemakaian *High Volume Fly Ash Concrete* (HVFAC) untuk menggantikan pemakaian beton normal menjadi solusi yang tepat (Suarnita, 2011). Selain itu pemakaian HVFAC juga menguntungkan dalam hal durabilitas dan menghasilkan serapan air yang rendah (Solikin, 2014).

3.2. Beton Daur Ulang

Beton daur ulang merupakan campuran yang diperoleh dari proses daur ulang material yang sebelumnya. Beberapa perbedaan kualitas, sifat-sifat fisik dan kimia agregat daur ulang, menyebabkan perbedaan sifat-sifat (properties) material beton yang dihasilkan, seperti menurunnya kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitasnya. Selain itu juga diamati perbedaan kemiringan kurva hubungan tegangan-regangan uniaksial dan multiaksial, yang menjadi landai pada saat sebelum beban puncak dan menjadi curam setelah beban puncak. Disamping itu, hubungan tegangan-regangan puncak multiaksial juga menjadi menurun. Perbedaan sifat-sifat material beton agregat daur ulang tersebut mengakibatkan beberapa perbedaan persamaan yang menggambarkan hubungan antara kuat tarik dan kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tekan, dan model konstitutif tegangan-regangan beton uniaksial, tegangan-regangan puncak multiaksial.

Beberapa persamaan dan model konstitutif telah diperoleh dari hasil studi eksperimental untuk menggambarkan perbedaan sifat-sifat dan perilaku mekanik beton agregat daur ulang.

3.3 Bahan Penyusun Beton

Bahan penyusun beton pada umumnya terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen *portland*, dan air. Pada penelitian ini digunakan bahan tambah berupa *mineral additive* ataupun *chemical additive* untuk meningkatkan performa beton yaitu menggunakan *superplasticizer* dan *fly ash* sebagai bahan tambah. Bahan-bahan penyusun beton adalah sebagai berikut.

3.3.1 Agregat Halus

Menurut SNI 02-6820-2002 mendefinisikan agregat halus merupakan agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Menurut SK SNI S-04-1989-F, sebagai bahan pengisi campuran beton, sebaiknya digunakan pasir yang memenuhi beberapa syarat sebagai berikut.

1. Harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras.
2. Butirnya harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh perubahan cuaca, yaitu terik matahari dan hujan.
3. Tidak mengandung lumpur lebih dari 5 %. Apabila kadar lumpur melampaui 5 %, maka harus dicuci.
4. Tidak mengandung bahan-bahan organik karena dapat mengadakan reaksi dengan senyawa-senyawa semen *portland* sehingga mengurangi kualitas adukan betonnya.

5. Tidak mengandung pasir laut karena mengakibatkan korosi pada tulangan.
6. Mempunyai modulus kehalusan antara 1,5 – 3,8

Tabel 3. 1 Gradasi Standar Agregat Halus (ASTM C-33)

Diameter Saringan (mm)	Persentase Lolos (%)
9,5	100
4,75	95 - 100
2,36 (No.8)	80 - 100
1,18 (No.16)	50 - 85
0,6 (No. 30)	25 - 60
0,3 (No.50)	Okt-30
0,15 (No. 100)	02-Okt

Sumber : *Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02 "Concrete and Aggregates". 1997.*

3.3.2 Agregat Kasar Alami

Agregat kasar adalah butiran mineral alami yang ukuran butirnya lebih besar dari 0,5 mm (Standar ASTM). Menurut Mulyono (2005), mendefinisikan agregat kasar adalah bantuan yang ukuran butirnya lebih besar dari 4.80 mm.

Tabel 3. 2 Susunan Besar Butiran Agregat Kasar

Diameter Saringan (mm)	Persentase Lolos (%)
38,1	95 - 100
19,1	35 - 70
9,52	10-30
4,75	0 - 5

Sumber: *ASTM, 1991*

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh agregat kasar menurut Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (SK SNI S-04-1989-F) adalah sebagai berikut :

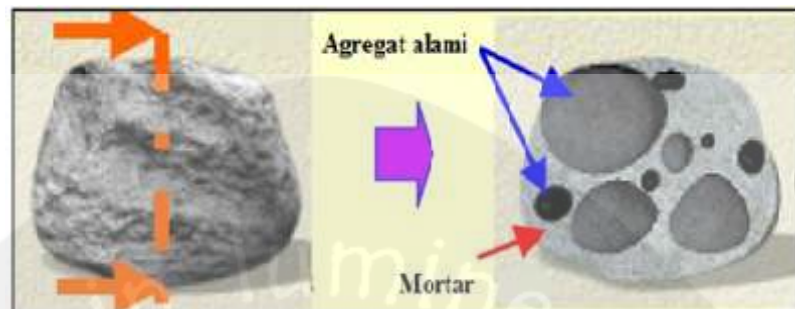
1. butir keras dan tidak berpori,
2. jumlah butir pipih dan panjang dapat dipakai jika kurang dari 20 % berat keseluruhan,
3. bersifat kekal,
4. tidak mengandung zat-zat alkali,
5. kandungan lumpur kurang dari 1 % (terhadap berat kering),
6. ukuran butir beranekaragam.

3.3.3 Agregat Kasar Daur Ulang

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan agregat daur ulang adalah memerlukan air pada adukan yang lebih tinggi karena sifat penyerapan air yang lebih besar, waktu pemadatan yang lebih lama karena plastisitasnya lebih rendah dan sifat permukaan agregat lebih kasar.

Berdasarkan hasil studi eksperimental, agregat daur ulang mengandung mortar sebesar 25 hingga 45 % untuk agregat kasar, dan 70 hingga 100% untuk agregat halus. Kandungan mortar tersebut mengakibatkan berat jenis agregat menjadi lebih kecil, lebih porous atau berpori, sehingga kekerasannya berkurang, dan unsur-unsur kimia agresif lebih mudah masuk dan merusak. Di samping itu, pada agregat daur ulang juga terdapat retak mikro, dimana retak tersebut dapat ditimbulkan oleh tumbukan mesin pemecah batu (*stone crusher*) pada saat proses produksi agregat daur ulang, yang tidak dapat membelah daerah lempengan atau patahan pada agregat alam. Retak tersebut tertahan oleh kekangan mortar yang menyelimuti agregat alam (suharwanto, 2015 dalam susanto, 2008).

Mortar pada agregat daur ulang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Potongan agregat daur ulang (Dosho, 2007)

Hasil dari pengujian eksperimental dengan sinar X (X-ray) terdapat perbedaan kandungan unsur-unsur kimia di dalam agregat daur ulang, yaitu unsur silika (Si) dan kalsium (Ca). Hal ini dikarenakan agregat daur ulang sebelumnya merupakan beton yang telah mengalami reaksi hidrasi, dimana unsur Si dan Ca yang terdapat pada agregat daur ulang diperoleh dari senyawa kalsium silika hidrat (C-S-H), ettringite (C-A-S-H), dan Ca(OH)_2 pada pasta semen yang masih menempel pada agregat alam. Oleh karena itu, unsur Ca pada agregat daur ulang lebih banyak dari pada unsur Si.

Beberapa perbedaan kualitas, sifat-sifat fisik dan kimia agregat daur ulang tersebut menyebabkan perbedaan sifat-sifat (properties) material beton yang dihasilkan. Perbedaan sifat-sifat dan perilaku mekanik material beton agregat daur ulang juga berpengaruh pada kinerja dan perilaku mekanik elemen struktur yang dibentuknya, diantaranya adalah kemampuan deformabilitas, nilai daktilitas, nilai kekakuan, dan pola retak. Deformabilitas elemen struktur beton agregat daur ulang menjadi lebih besar pada saat beban yang sama, nilai daktilitas dan kekakuan menjadi

kecil, dan pola retak menjadi lebih banyak hingga ke daerah momen dan geser (antara perletakan dan titik beban), bila dibandingkan dengan kinerja dan perilaku beton agregat alam.

Perbedaan sifat-sifat material beton agregat daur ulang tersebut mengakibatkan beberapa perbedaan persamaan yang menggambarkan hubungan antara kuat Tarik dan kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tekan. Perbedaan sifat-sifat dan perilaku mekanik material beton agregat daur ulang juga berpengaruh pada kinerja dan perilaku mekanik elemen struktur yang dibentuknya (Suharwanto, 2005). Perbedaan kinerja dan perilaku mekanik elemen struktur tersebut diantaranya adalah kemampuan deformabilitas, nilai daktilitas, nilai kekakuan, dan pola retak. Deformabilitas elemen struktur beton agregat daur ulang menjadi lebih besar pada saat beban yang sama, nilai daktilitas dan kekakuan menjadi kecil, dan pola retak menjadi lebih banyak hingga ke daerah momen dan geser (antara perletakan dan titik beban), bila dibandingkan dengan kinerja dan perilaku beton agregat alam.

Proses produksi agregat daur ulang hampir sama dengan proses produksi agregat alami. Perbedaan yang mendasar terletak pada proses memisahkan agregat dari komponen yang lain seperti besi tulangan, kayu, kertas, dan sebagainya. Seperti tampak pada gambar 3.2. langkah utama pada proses produksi agregat daur ulang yaitu: pemilihan pendahuluan (*preliminary sorting*), penghacuran awal (*primary crushing*), permissahan dari komponen yang tidak diinginkan (*impurity removal process*),

penghancuran tahap kedua (*secondary crushing*) dan pengayakan menjadi ukuran tertentu (*sizing into different sizes*).



Gambar 3.2. Proses Produksi Agregat Daur Ulang Di Tuen Mun Area 38 (Fong dan Yeung, 2003)

Proses preliminary sorting bertujuan untuk memisahkan material yang dapat didaur ulang dan yang tidak. Material yang dapat didaur ulang selanjutnya akan dihancurkan ke dalam ukuran tertentu, sedangkan yang tidak dapat didaur ulang dapat digunakan sebagai bahan timbunan (reklamasi). Di Indonesia produksi agregat daur ulang belum dilakukan secara massal dan komersial.

3.3.4 Semen *Portland*

Menurut (SK SNI S-04-1989, 1989:1) Semen *portland* ialah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker terutama dari silikat - silikat kalsium yang bersifat hidrolis (dapat mengeras jika bereaksi dengan air) dengan gips sebagai bahan tambahan. Menurut (Amri, 2005)

semen pada pekerjaan beton difungsikan sebagai bahan pengikat antara agregat kasar dan agregat halus yang akan menghasilkan bentuk yang direncanakan serta harus memiliki sifat sebagai pengikat.

Sifat-sifat kimia dari bahan pembentuk ini mempengaruhi kualitas semen yang dihasilkan, sebagaimana hasil susunan kimia yang terjadi diperoleh senyawa dari semen *Portland*. Sedangkan untuk susunan oksida semen *Portland* (Paul Nugraha & Antoni, 2007), sebagai berikut :

Tabel 3.3 Senyawa Utama dari Semen *Portland*

Nama Senyawa	Rumus Empiris	Rumus Oksida	Notasi	Kadar Rata-rata
Trikalsium Silikat	Ca_3SiO_5	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S	50
Dikalsium Silikat	Ca_2SiO_4	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S	25
Trikalsium Alumnat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	12
Tetrakalsium Aluminoforit	$2\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}_3$	C4AF	8
Calcium sulfate dyhydrae		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH2	3,5

Sumber : (Paul Nugraha & Antoni, 2007)

Tabel 3.4 Susunan Oksida Semen *Portland* Secara Umum

Oksida	Notasi Pendek	Nama Umum	% Berat
(CaO)	C	Kapur	63
(SiO ₂)	S	Silika	22
(Al ₂ O ₃)	A	Alumunia	6
(Fe ₂ O ₃)	F	Besi	2,5
(MgO)	M	Magnesia	2,6
(SO ₂)	S	Sulfur dioksida	2
(K ₂ O)	K	Alkalis	0.6
(Na ₂ O)	N	Disodium oksida	0.3
(CO ₂)	C	Karbondioksida	-
(H ₂ O)	H	Water	-

Sumber : (*Paul Nugraha & Antoni, 2007*)

Tabel 3.5 Sifat Masing – masing Komposisi Utama Semen

Bahan	Kecepatan Hidrasi	Panas Hidrasi (J/g)	Andil terhadap kekuatan	susut
C3S	cepat	503 - tinggi	> setelah 28 hari	sedang
C2S	lambat	260 - rendah	> setelah 28 hari	sedang
C3A	Sangat cepat	867 - sangat tinggi	> dalam 1 hari	besar
C4AF	cepat	419 - sedang	Sedikit	kecil

Sumber : (*Paul Nugraha & Antoni, 2007*)

3.3.5 Air

Air merupakan bahan dasar perekat semen dengan bahan penyusun beton lainnya. Bila dicampurkan dengan semen, air akan melakukan reaksi hidrasi membentuk pasta semen yang dapat mengikat fragmen-fragmen bahan penyusun beton lainnya. Menurut Mulyono (2005), air digunakan

dalam pembuatan beton untuk memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan pada pekerjaan beton.

Air pada campuran beton akan berpengaruh terhadap :

1. Sifat *Workability* adukan beton.
2. Besar kecilnya nilai susut beton.
3. Kelangsungan reaksi dengan semen *portland*, sehingga dihasilkan dan kekuatan selang beberapa waktu.
4. Perawatan keras adukan beton guna menjamin pengerasan yang baik.

Tjokrodinuljo (2007), memaparkan bahwa penggunaan air untuk beton setidaknya harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gr/liter,
2. Tidak mengandung garam - garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik) lebih dari 15 gr/liter,
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gr/liter
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gr/liter.

3.4 Bahan Tambah

Bahan tambah atau *Admixture* didefinisikan dalam *Standard Definitions of Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates* (ASTM C.125-1995) dan dalam *Cement and Concrete Terminology* (ACI SP-19) merupakan material selain air, agregat, dan semen hidrolik yang dicampur dalam beton atau mortar yang ditambahkan sebelum atau selama pengadukan berlangsung. Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 *Superplasticizer*

Superplasticizer merupakan bahan tambah kimia yang digunakan untuk mengurangi penggunaan air, sehingga akan dapat menghasilkan adukan dengan nilai faktor air semen lebih rendah pada nilai kekentalan adukan yang sama. Hal ini mengakibatkan kuat tekan beton akan menjadi lebih tinggi (ASTM C494 dan British Standard 5075). Selain itu juga penggunaan *superplasticizer* untuk beton mutu tinggi secara umum sangat berhubungan dengan pengurangan jumlah air dalam campuran beton. Pengurangan ini tergantung pada kandungan air yang digunakan, dosis serta tipe dari *superplasticizer* yang dipakai (L.J. Parrot, 1998).

Dalam penelitian ini akan digunakan *superplasticizer* dari produk sika dengan nama dagang Sika Viscocrete-1003. Viscocrete 1003 ini merupakan bahan tambah kimia (*chemical admixture*) yang berfungsi untuk meningkatkan *workability* beton sampai pada tingkat yang cukup besar. *Superplasticizer* ini berguna untuk mereduksi penggunaan air lebih dari 30% serta memiliki *flowability* yang sangat baik. Ada beberapa keistimewaan dari penggunaan viscocrete 1003 ini, antara lain:

- a. memiliki *flowability* yang sangat baik,
- b. sebagai bahan kimia yang dapat mereduksi penggunaan air pada beton yang akan membuat beton lebih padat, sehingga akan mempengaruhi kuat tekan yang diperoleh,
- c. memiliki sifat memadat sendiri (*self-compacting*) yang baik,
- d. dapat mengurangi terjadinya *bleeding* dan segregasi pada beton,

- e. viscocrete 1003 ini dapat membuat udara dalam beton berkurang bahkan tidak ada udara yang masuk ke dalam beton,

Adapun spesifikasi (*technical* data dari sika viscocrete 1003 dapat dilihat pada tabel 3.6 berikut ini :

Tabel 3. 6 Data Teknis Sika Viscocrete 1003

Bentuk	Cair
Warna	Brownish
Kerapatan relatif @ 20°C	1,06
Kandungan material kering %	30
Dosis % berat semen	0,6 - 1,6
Ph	4,5
<i>Water Soluble Chloride Content %</i>	<i><0,1 Chloride Free</i>
<i>Equivalent Sodium Oxide as Na₂O</i>	0,30

3.4.2 Fly Ash

Abu terbang (*fly ash*) merupakan limbah padat hasil pembakaran batubara yang tergolong limbah B3, karena mengandung oksida logam yang akan mengalami reaksi secara alami yang akhirnya akan mencemari lingkungan.

Menurut ASTM C.618 (ASTM, 1995:304), fly ash didefinisikan sebagai butiran halus residu pembakaran batubara atau bubuk batubara. Fly ash dapat di kelompokkan menjadi dua, yaitu abu terbang normal yang dihasilkan dari pembakaran batubara antrasit atau bitominus atau abu terbang kelas C yang dihasilkan dari pembakaran batubara jenis lignite atau subbitumeus. Tabel 3.7 akan menunjukkan kandungan kimia yang dibutuhkan dalam *fly ash* (ASTM C.618-95:305) :

Tabel 3. 7 Kandungan Kimia Pada *Fly Ash*

Senyawa Kimia	Jenis F	Jenis C
Oksida Silika (SiO ₂) + Oksida Alumina (Al ₂ O ₃) + Oksida Besi (Fe ₂ O ₃), minimum%	70,0	50,0
Trioksida Sulfur (SO ₃), maksimum%	5,0	5,0
Kadar Air, maksimum%	3,0	3,0
Kehilangan Panas, maksimum%	6,0	6,0

Sumber: ASTM C.618-95: 305

3.5 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan salah satu sifat mekanis beton yang terpenting untuk menentukan kualitas mutu beton. Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan (Wibawa, 2011). Kuat tekan beton dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusunnya. Jumlah air dan semen dalam beton merupakan faktor penentu utama kuat tekan yang dihasilkan beton. Suatu jumlah air dan semen dalam beton diperlukan untuk memberikan aksi kimiawi dalam pengerasan beton, dimana kelebihan air dapat meningkatkan kemampuan pekerjaan namun dapat menurunkan kekuatan dari betonnya (Wang, C.K. dan Salmon, C.G., 1986). Kekuatan beton yang paling umum digunakan sekitar 22 kg/cm² sampai 500 kg/cm².

Nilai kuat tekan diperoleh dari pengujian terhadap silinder beton (diameter 150 mm dan tinggi 300 mm) yang diberikan beban dan ditekan sampai hancur. Sedangkan menurut SNI 1974-2011, untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton dari hasil pengujian dengan mesin uji diformulasikan sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan:

$f'c$ = kuat tekan (MPa)

P = beban tekan (N)

A = luas penampang benda uji silinder (mm²)

3.6 Modulus Elastisitas Beton

Tolak ukur yang umum dari sifat elastis suatu bahan adalah modulus elastisitas, yang merupakan perbandingan dari tekanan yang diberikan dengan perubahan bentuk persatuan panjang, sebagai akibat dari tekanan yang diberikan (Murdock dan Brock, 1999). Sesuai dengan SNI-03-1726-2002 dan SNI-03-2847-2002 untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas beton secara teoritis di gunakan rumus–rumus sebagai berikut.

$$Ec = w_c^{1,5} (0,043) \sqrt{f'c} \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan :

w_c = berat beton antara 1500-2500 kg/m³(kg/m³)

$f'c$ = mutu beton (MPa)

Ec = modulus elastisitas (MPa)

Dan untuk beton dengan berat normal yang berkisar 2320 kg/m³ :

$$Ec = 4700 \sqrt{f'c} \dots\dots\dots(3.3)$$

Berdasarkan penelitian oleh Wang, C. K. and Salmon, C.G., (1986), untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas beton digunakan rumus :

$$Ec = \frac{0,3 \times f_{maks}}{\nu p} \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan :

Ec = modulus elastisitas beton tekan (MPa)

f_{maks} = tegangan beton maksimum (MPa)

p = regangan beton

3.7 Daya Serap Air Beton

Menurut SNI 03-2914-1990, sifat beton kedap air harus memenuhi persyaratan berikut ini.

1. Beton kedap air normal bila diuji dengan cara perendaman dengan air selama 10+0,5 menit, resapan maksimum adalah 2,5% terhadap berat beton kering oven. Selama perendaman 24 jam, resapan maksimum adalah 6,5% terhadap beton ringan kering oven.
2. Beton kedap air agresif bila diuji dengan tekanan air, maka tembusnya air ke dalam beton tidak melampaui batas berikut ini.
 - a. Agresif sedang : 50 mm
 - b. Agresif kuat : 30 mm

Pada penelitian ini digunakan silinder diameter 100 mm dan tinggi 200 mm untuk melakukan pengujian penyerapan air. Adapun rumus yang dapat digunakan untuk menghitung serapan air :

$$S = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100\% \dots\dots\dots(3.5)$$

Keterangan :

- w_1 = berat beton kering oven (kg)
 w_2 = berat beton kering permukaan (SSD) (kg)
 S = daya serap air (%)